

红壤丘陵区农林复合生态系统研究与展望^①

何园球¹, 樊剑波¹, 陈 晏¹, 陈长青²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 南京农业大学, 南京 210095)

摘要: 本文针对红壤丘陵区农林复合生态系统存在的问题, 分析了红壤农林复合生态系统现状、结构功能与结构演替规律; 提出了红壤农林复合生态系统的五级分类系统; 初步建立了红壤地区农林复合生态系统评价指标体系框架, 并对典型县域复合生态系统进行了评价; 在此基础上, 提出了红壤丘陵区农林复合生态系统的优化调控措施以及资源持续利用对策, 并对该区农林复合生态系统的后继研究进行了展望。

关键词: 红壤; 农林复合生态系统; 评价

中图分类号: S181

农林复合生态系统是指在一个土地利用单元中, 人为地把木本植物与农作物以及畜禽养殖多成分结合起来的土地利用系统, 是世界各地农业实践中一种古老而有效的土地利用方式^[1]。

我国南方红壤丘陵区分布面积约 200 万 km², 其中丘陵山地约 100 万 km²^[2]。红壤农业历史悠久, 修建梯田梯地和绿化以保持水土, 实行农畜结合和种植绿肥的“有机农业”, 重视环境保护和培肥土壤, 符合生态学的原理, 为今天农业生态学和土地生态学的建立和发展提供了先例。自 20 世纪 70 年代以来, 该区提倡粮食、蚕桑、果树生产“上山”, 红壤农业在当地经济中的比重不断增加, 是我国重要的粮食(水稻)–经济作物(茶叶、柑橘等)产区^[3]。但随着人口不断膨胀和一系列非持续性发展因素的积累影响, 需求日益突出, 非农占用耕地急剧增加, 可垦荒地面积越来越少, 致使该区面临一系列重大的生态环境问题: 水土流失、土壤肥力下降、季节性干旱频繁发生等, 而红壤的退化又对气候、水分、养分循环、生态环境等产生一系列影响^[4]。解决该区农业问题的出路, 一方面要充分利用和保护好现有耕地, 控制非农业占用土地的速度, 大力改造中低产田, 不断提高农产品的数量和质量; 另一方面要把注意力转移到广阔的丘岗地区, 同时要综合考虑农业的有效布局和土地的综合和合理利用, 保护环境, 增加产出^[5]。从技术经济与生态环境有机结合上来认真思考已经发展起来的现

代农业, 努力探索以生态为基础、经济与生态相结合的现代农林复合发展模式。因此, 认真研究该区农林复合生态系统的结构、功能、演替和增产技术及各个环节间的联系, 加强对系统中水分、养分循环等动态过程的了解, 建立合理的评估系统和调控机制, 对充分发挥这类资源的巨大潜力, 促进红壤地区大农业持续发展均有十分重要的意义。

1 红壤农林复合生态系统的现状和分类

1.1 红壤农林复合生态系统的现状

人们对农林复合生态系统的认真总结并建立其科学体系始于 20 世纪中期。1977 年, Bene 完成了关于贫困地区的热带国家农业和林业状况的报告, 首次使用了农林复合生态系统(Agroforestry), 并对此进行释义。同年, 国际农林复合生态系统研究委员会成立, 从此, 农林复合生态系统成为一门独立学科, 农林复合生态系统的研究方兴未艾^[6]。

农林复合生态系统在我国有着悠久的历史 and 多种多样的类型。我国红壤地区水热条件优越, 生物循环活跃、动植物资源丰富多样, 加上较多的山、丘、岗等土地资源和比较紧张的人地关系, 从客观和主观两个方面促进了该区农林复合生态系统的发展。主要类型有^[7–9]:

1) 林胶茶复合系统。该系统是调整产业结构、解决劳动力就业的需要, 又是模拟热带雨林多层次多

基金项目: 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-STS-016)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB15030200)、国家自然科学基金项目(31201690)和公益性行业(农业)科研专项课题项目(201203050-3)资助。

作者简介: 何园球(1955—2014), 男, 湖北浠水人, 博士, 研究员, 长期从事农业生态学方面的研究。E-mail: yqhe@mail.issas.ac.cn

物种的结构特点,进行科学组分,为提高原有传统人工群落的生产力、稳定性及环境保护的一种尝试。

2) 桑基鱼塘系统。主要分布在广东珠江三角洲地区,当地人民因势利导,将低洼地挖塘培基,基种桑,塘养鱼,逐渐发展成为一种独特的水陆结合的农林鱼复合系统。

3) 果粮间作类型。热带、亚热带水果种类繁多,果粮间作,形成果园的多层立体结构,是目前热带、亚热带果园发展方向。

4) 丘陵岗地农林复合生态系统。该系统是红壤地区复合系统的主流模式,最典型的有中国科学院红壤生态实验站设计的“顶林、腰果、谷农、塘鱼”模式和中国科学院千烟州实验站设计的红壤丘陵综合治理开发模式。

随着科学技术的发展、生产实践和人们认识的提高,对红壤的开发利用将不断创造出多种模式。

1.2 红壤农林复合生态系统的分类

Nair^[10]于 1985 年首先建立了农林业系统数据库,提出了系统结构、功能、生态环境和社会经济规模 4 种分类标准,并对世界主要热带地区的农林业系统进行分类。熊文愈^[11]将复合农林业分为:林农、林牧、林渔、林农渔、林副等 5 大类;宋兆民

和孟平^[12]将中国农林业划分为农林间作、林牧业经营、农林牧经营、多用途经营等 5 种系统类型;黄宝龙和黄文丁^[13]将农林业划分为 7 个系统 26 个类型;李文华^[1]提出按照系统、类型组、类型和结构型 4 个等级,把我国农林复合业划分为庭院经营系统、田间生态系统和区域景观系统;朱清科等^[14]也按生态系统分类,将黄土高原农林复合生态系统分为复合系统、结构类型、复合模式、栽培经营方式等 4 个等级;孙述涛^[15]则主张功能分类法,按功能-结构-组分的顺序进行划分。

但这些分类没有考虑气候带和各地社会、经济的巨大差异,没有考虑资料的完整统计单元,也没有考虑第二、三产业对第一产业的巨大影响。因而对其模式的评价是不完善的,甚至在某些地区也是不符合实际情况的。针对这些问题,我们提出了红壤丘陵地区农林复合生态系统的分类方法和标准。

根据温度和无霜期、坡度和海拔高度、复合度和结构类型等将红壤坡地农林复合生态系统分为五级结构,这种分类将气候带、地貌和农林结构紧密结合。根据五级结构综合分析了县级复合农业生态类型、地貌单元复合农业生态类型和农户复合农业生态类型三大类^[16](表 1)。

表 1 我国红壤丘岗坡地农林复合生态系统分类
Table 1 Classification of agroforestry system in hilly red soil region of China

第一级指标	第二级指标	第三级指标	第四级指标	第五级指标	
北亚热带 10 5 000 ~ 6 100 期 = 220 ~ 270 天	积温 = ;无霜 = 220 ~ 270 天	坡度(0°~ 8°; 8°~ 15°; 15°~ 25°);岗地(0 ~ 100 m); 丘陵(100 ~ 300 m)	半农半林农林复合型; 以农为主农林复合型; 以林为主农林复合型	纯农类型;农林类型; 农果类型;农牧果类型; 农果菜类型;农牧菜等	柑橘花生间作模式;杉 木、茶红薯间作模式; 柑橘红薯间作模式等
中亚热带 10 6 100 ~ 7 000 霜期 = 270 天以上	积温 = ;无 霜期 = 270 天以上	同上	同上	同上	
南亚热带 10 7 000 ~ 9 000 期 = 300 天以上	积温 = ;无霜 期 = 300 天以上	同上	同上	同上	

该分类从理论上对红壤区农林复合生态系统进行了探讨,也是一个基础性的工作,对研究我国农林生态系统有不可替代的作用,还可作为其他农业生态系统分类的参考。

2 红壤农林复合生态系统结构和功能

2.1 红壤农林复合生态系统的结构及障碍

农林复合生态系统的结构反映环境资源利用是否合理,与系统内部生态经济关系是否协调,从而决定着系统整体的功能水平。分析系统内部生态、经济以及技术结构的状况和动态演替规律,能反映生态系统的协调度和经济、技术结构的合理度,揭示农林复

合生态系统的主要生态经济关系的基本特征和变化规律,解释系统各功能水平的大小,指明农林复合生态系统改革和发展的方向。

对于种植业来说,应根据红壤区的特点和不同坡位土壤理化性质差异,因地制宜,合理规划,变沟谷型农业为立体开发型农业,变单一农作物为农林果草综合配置,强调规模和连片,以挖掘其资源潜力。主要有两种布局^[9]:

1) 顶林、腰果、谷农垂直立体布局。对于丘岗地来说,从丘顶到坡麓,可分为流失段、过渡段和积累段。丘岗中上部土壤薄、旱、瘦,应以林为主,包括用材林、薪炭林和水保林,如马尾松、木荷、胡枝

子等；丘岗中下部土壤为过渡段，应发展高效且能吸收深土层水肥的经果间作，如猕猴桃、板栗、甜柿、柑桔、无花果、枇杷、绿茶、中药材、花生、油菜等；坡麓土层厚、肥、润，宜种水肥条件要求较高的粮食、蔬菜和饲料，如水稻、玉米等。实行垂直立体种植，遵循着生态学的基本原理，并能取得短中长期的效益。

2) 间、套、混作地块立体布局。对于每个层段来说，作物布局应从提高土壤水肥利用率、充分利用地力、增加经济效益及改善生态环境出发，实行地块立体农业布局，如农林混作、果农间作、农(果)肥间套作、不同作物间套作等耕作方式，使高矮、生育期、营养需求不同的植物形成适生互补的共生群落，增加生物产量和生态、经济效益。

但红壤丘陵地区农业和土地利用也存在以下不足之处：立体结构不明显，“人放天养”和掠夺经营；组分过于单一，协同利用水分养分能力不强；种养加贸未能一体化，影响产品的出售、增值和再投入。该区巨大的资源潜力非但没有发挥，反而生态环境严重退化。因此，在综合开发治理过程中应根据自然、社会经济条件以及地形部位和土壤肥力特性进行合理农业布局，并实施有效的调控，迅速恢复植被和自然景观，促进生态系统的良性循环。

2.2 红壤农林复合生态系统水分循环及障碍^[17-18]

2.2.1 水分循环特点 统计表明，该区年均降雨量为 1 760.3 mm，最大为 2 548.3 mm，最小为 1 040.7 mm，变异系数为 0.19。3—6 月为雨季，占年降雨量的 58.96%。气温、日照和蒸发量基本同步，以 5—7 月

最高，与降雨量相比，出现明显的滞后效应(图 1)。地表径流以 4—7 月最大，占全年的 80%~83%，泥沙主要集中在 5—7 月，占全年 80% 左右，土壤渗漏水以 3—6 月最大，占全年的 68%~76%。土壤水动态与降雨动态基本吻合，旱季水分上移，雨季相反。

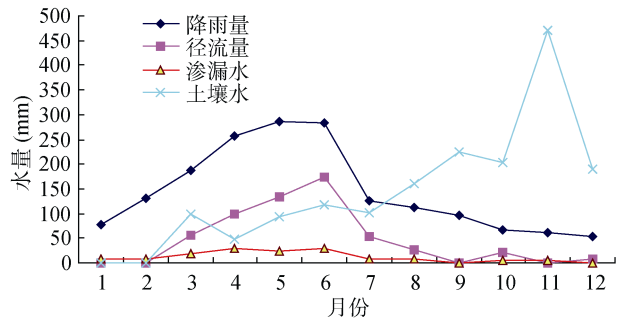


图 1 红壤种植系统水分动态
Fig. 1 Moisture dynamic of plant system in red soil region of China

综上所述，红壤旱地水分循环的主要特点是：降雨时空分布不均，涝渍害和伏秋干旱经常发生；水土流失严重，造成土壤板结和养分贫瘠；土壤持水量高，但表层有效水含量却低。

2.2.2 水分平衡特点 根据 15 年的定位资料计算了不同利用方式下红壤的水分收支状况。研究表明：优化的种植方式比原有种植方式节省水分，主要是减少了蒸发量和地表径流(表 2)，从而提高了水分利用率；优化种植方式基本上能适应作物需水和天然降水这种供需不平衡的水分特征，从而在一定程度上减少了干旱发生的频率；优化种植方式能充分利用深层土壤水分和分层利用土壤水分，从而延缓干旱时期，减少干旱程度，达到持续稳产的目的。

表 2 红壤旱地不同种植方式的水分平衡(1991—2005 年) (t/hm²)
Table 2 Water balances of different plant fashions in upland of red soil of China

项目	收入				开支				平衡
	降雨	灌溉水	截留水	小计	蒸发蒸腾	地表径流	深层渗漏	小计	
优化模式									
阔叶林	18 000			18 000	14 640	5 119	1 534	21 293	-3 293
混交林	18 000			18 000	14 640	4 784	1 647	21 071	-3 071
地块模式 1	18 000	148	1 494	19 642	14 436	880	4 323	19 642	0
地块模式 2	18 000	644	1 494	20 138	14 100	1 415	4 623	20 138	0
水田	18 000	8 983	887	27 870	14 170	4 200	9 500	27 870	0
传统模式									
针叶林	18 000			18 000	14 640	5 737	1 442	21 819	-3 819
荒坡	18 000			18 000	10 180	8 447	1 183	19 810	-1 810
地块对照	18 000	738	747	19 485	13 754	419	5 312	19 485	0
地块模式 3	18 000	1 573	1 494	21 067	15 436	1 183	4 448	21 067	0
地块模式 4	18 000	946	1 494	20 440	15 500	999	3 941	20 440	0
水田	18 000	9 183	887	28 070	14 170	5 400	8 500	28 070	0

注：地块模式 1：奈李+花生-绿肥-花生；地块模式 2：玉米-荞麦-大麦-玉米；地块模式 3：柑橘+花生-绿肥-花生；地块模式 4：花生-绿肥-花生-绿肥，下同。

2.2.3 水分循环障碍 水分流失量大:降雨到达地面及进入土壤过程中,除蒸发以外,主要是地表径流和深层渗漏损失,二者占降雨量的 39%~63%,而实际保留在土壤中的水分只占 20%~40%。水分供需不平衡:降雨时空分布不均造成春天涝渍害,夏秋伏旱、秋旱或伏秋连旱,水土流失量大。水分有效性低:红壤田间持水量一般在 300 g/kg 左右,但其有效水含量却在 50~100 g/kg,出现土壤持水量高而又显干旱的不协调现象。然而,红壤干旱主要发生在表层,30 cm 以下土层水分较丰富,这种水分特征对浅根性作物造成严重影响,而对林木影响较小。

2.3 红壤农林复合生态系统养分循环及障碍分析^[18-19]

2.3.1 养分循环特点 养分循环主要包括养分收入、支出和再循环等基本途径。从表 3 可以看出,优

化种植方式有机肥施入较多,养分循环速率高,原有种植方式则相反;不同种植方式以柑桔+花生-绿肥、玉米-荞麦-大麦和稻-稻-肥较高,其他则低;不同养分元素再循环率以优化种植方式中的 P 和 K 较高,原有种植方式较低。因此,原有种植方式养分循环特点是:养分损失大,主要是 N 挥发,P 被土壤固定,K 因径流和渗漏损失;肥料施用量较大,不同肥料配比不合理,不同种植方式间存在差异;秸秆还田率较高,其他有机肥源有待进一步利用。

2.3.2 养分平衡特点 从表 3 可以看出不同种植方式养分循环主要有如下特点:1)同一地点优化种植方式比原有种植方式有利于 N、P、K 积累,使土壤肥力不断提高,上部荒坡 N、P、K 出现负值,使土壤肥力下降;不同种植方式养分盈余量以果树>水田>旱地>林草,不同元素在果园和旱地以 P、K 盈余最多,在水田以 N 盈余最多。

表 3 不同种植方式养分循环与平衡(1991—2005 年) (kg/hm²)
Table 3 Nutrient cyclings and balances of different plant fashions

项目	收入			开支			平衡(%)			收入/开支			养分循环速率			
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	
优化模式	阔叶林	177	12	205	141	8.3	130	25.5	44.8	58.2	1.26	1.45	1.58	318	20.3	235
	混交林	155	13	139	128	8.1	84	21.1	55.6	65.5	1.21	1.56	1.66	283	21.1	223
	地块对照	11	1.8	31	36.5	4.2	75	-70.0	-57.1	-59.2	0.30	0.43	0.41	47.5	6.0	106
	地块模式 1	724	294	469	688	96	435	5.2	206	7.8	1.05	3.06	1.08	1412	390	904
	地块模式 2	373	81	403	349	47	300	69	723	34.3	1.07	1.72	1.34	722	128	703
	稻-稻-肥	646	167	476	528	79.6	359	22.3	110	32.6	1.22	2.10	1.33	1174	246.6	835
传统模式	稻-稻-油(麦)	680	197	511	643	96	491	5.8	105	4.0	1.06	2.05	1.04	1323	293	1002
	针叶林	96	9.2	94	99.8	6.8	97.8	-3.0	35.3	-3.9	0.97	1.35	0.96	195.8	16.0	191.8
	地块对照	11	1.8	30.6	35.7	4.2	75	-69.7	-57.1	-59.2	0.30	0.43	0.41	46.7	6.0	105.6
	地块模式 3	728	294	468	688	92	450	5.8	220	4.1	1.06	3.20	1.04	1416	386	918
	地块模式 4	382	82	408	363	48	335	52	70	21.8	1.05	1.70	1.22	745	130.0	743
	稻-稻-闲	539	121	207	463	63.5	329	16.4	91.0	-37.1	1.16	1.91	0.63	1002	184.5	536

注: 平衡(%)=(收入-支出)/支出×100%; 养分循环速率 = 养分收入 + 养分支出。

2) 优化种植方式养分收入和支出的比值以 P 最大,N 和 K 有一定的积累,原有种植方式除稻田以外比值均较小。这意味着要优化种植方式,同时,调整 P 肥施用制度,使养分收支能调整到一个合理的水平。

3) 养分循环速率均以农田>果作>林草亚系统;优化种植方式各元素养分循环速率以 N 最大,N、P、K 的平均比值约为 3:2:2。原有种植方式养分循环速率较低,不同种植方式以农田最快,N、P、K 的平均比值为 1:1:2。

2.3.3 养分循环障碍 原有种植方式养分损失季节不均,受降雨和温度影响大;养分损失大,70%的

N 挥发和损失,90%的 P 被土壤固定,70%的 K 因径流和渗漏损失;养分的利用率低,主要是布局不合理、施肥不当和养分再循环率低所造成的;人为干预大,但不完全合理、投资效果差。此外,还存在养分循环速率较高、P 盈余较多及养分周年使用不均等问题。

2.4 红壤农林复合生态系统的结构演替

系统结构决定系统功能,分析一个系统的结构及其变化,可以评价一个系统的稳定性,掌握系统的发展趋势。根据本地区的特点,我们建立了评价系统结构变动的 5 个指标^[20-21]:

1) 相对变动系数(C_r)。指系统内某一部门的某一

要素在确定时段内所占比重的总变化,反映了该要素在该时段内的变动程度。 C_r 越大,表明该要素的变动越大,可以用于不同要素的比较。计算公式如下:

$$C_r = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{X_t - \bar{X}}{X_{\max}} \right)^2}{T-1}}$$

式中: C_r :某要素的结构相对变动系数; X_t :该要素在第 t 年所占百分比; \bar{X} :该要素在起始年和终止年内各年度占百分比的平均值; X_{\max} :该要素在所有年份中的最大百分比; T :研究时段中年份总数。

2) 整体变动系数(C_w)。指系统内某一部门在确定时段内,各要素所占比重的年度变化总和的平均值,反映该部门结构的整体变动程度。 C_w 越大,表明该部门结构的整体变动越大,可用于不同部门间结构变动程度的比较。计算公式如下:

$$C_w = \frac{\sum C_{ri}}{N}$$

式中: C_w :某一部门的结构整体变动系数; C_{ri} :该部门第 i 个要素的相对变动系数; N :该部门的要素个数。

3) 结构的变动趋势系数(C_t)。指系统内某一部门的某一要素在确定时段内,各年份所占比重的变动幅度,反映该要素的变动趋势。若 $C_t < 0$,表明该要素的比重呈下降趋势;若 $C_t > 0$,则表明该要素的比重呈递增趋势; $|C_t|$ 值越高,则该要素的变动幅度越大。计算公式如下:

$$C_t = \frac{X_t - \bar{X}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

式中: C_t :某一要素的结构变动趋势系数; X_t :该要素终止年份所占的百分比; \bar{X} :该要素起始年份所占的百分比; X_{\max} :该要素的最大百分比; X_{\min} :该要素的最小百分比。

4) 比较优势系数(Y_i)。衡量不同地区不同产业、不同行业在全国的比较优势。 $Y_i > 1$,表示本地区 i 产业具有“比较优势”,若 $Y_i < 1$,则视为“比较劣势”。其计算方法为:

$$Y_i = (Z_i/Z_s)/(GDP/GDP_s)$$

式中: Y_i :为 i 产业的比较优势系数; Z_i :为 i 产业增加值; Z_s :为全国 i 产业增加值; GDP :为本地区 GDP 总额; GDP_s :为全国 GDP 总额。

5) 协调指数(H)。农业中农林牧渔协调发展的程度,其计算方法为:

$$H = 1/(n \cdot \sum A_i^2)$$

式中: H :协调度; A_i :农林牧渔各部门产值占总产值的比例; n :统计的部门数。

农林复合生态系统演替的原因可分为内因和外因两方面。农林复合生态系统内部各组成成分之间的相互作用是演替的主要动因。如农业内部各产业之间相互联系、相互作用,某一产业的变化可能会影响到另一产业变化,外界加给农林复合生态系统的各种因素,主要是政策、社会需要、工业发展以及人民生活方式变化、生活水平改变等^[22]。外因虽然是由外界因素引起的,但外因只能通过使农林复合系统各组分及其相互关系发生改变,进而使系统发生演替。

3 红壤农林复合生态系统的评价

3.1 指标体系的构建程序与方法^[23]

3.1.1 指标设置 采用系统分析和频度统计法。系统分析就是根据农林复合生态系统可持续发展特征,凡是能够描述该系统各层状态的所有指标尽可能列出,以防止重要指标遗漏。频度统计法就是对前人在本领域研究的报告和论文进行统计分析,选用使用频度较高的指标(表 4)。

表 4 农业可持续发展评价指标出现频率统计
Table 4 Frequency statistics of evaluation indexes for agricultural sustainable development

出现频率	评价指标
80% 以上	工农业总产值、农民人均纯收入、森林覆盖率; 抗灾能力、劳动力素质、人口自然增长率
60% 以上	劳动生产率、农产品商品率、农产品人均占有量、稳产高产田比重、农业在 GDP 中的比值、第三产业在 GDP 中的比值、退化土地自立达标率、耕地面积变化、贫困人口比重
40% 以上	土地生产率、土壤质量变化、秸秆循环利用率、人均水资源占有变化率
20% 以上	粮食总产变化率、农村环境污染程度、农业劳动力比重

3.1.2 指标的选择 根据综合评价的原则、所研究区域的特点、评价指标库以及收集资料数据的可能性选择指标。例如根据高州市水果、第三产业比重,农民收入高等特点以及该市“兴商强农”的战略方针,积极调整和优化农业产业结构、扶持发展农业龙头企业、有效地提高全市农业经济质量的发展目标,我们选择和确定了该市农业生态系统可持续性评价的指标体系。

3.1.3 指标的标准化 由于所选择的诸多指标值间的量纲不同和数量级差悬殊等原因,就必须对指标选择合适的基准值和统一量纲,本研究采用最小极差

法: x 用 $x = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$ 转换,其中 x_{\max} 和 x_{\min} 分别

表示指标中的最大值和最小值^[24]。

3.2 指标权重的确定与综合评价

确定权重的主要方法有特尔菲(Delphi)法(也称专家咨询法)和层次分析法(AHP),但是应用 Delphi 法分配权重的难度和工作量将会随指标数量的增多而加大, AHP 法则会存在排序系统不同程度的对指

标的强化和弱化问题。而采用 Delphi 法和 AHP 法相结合的方法,可以做到取长补短,达到对系统进行科学评价的目的^[25]。

1) 建立指标体系层次结构模型。根据对所研究对象的分析,建立层次结构的目标层,准则层、指标层(图 2)。

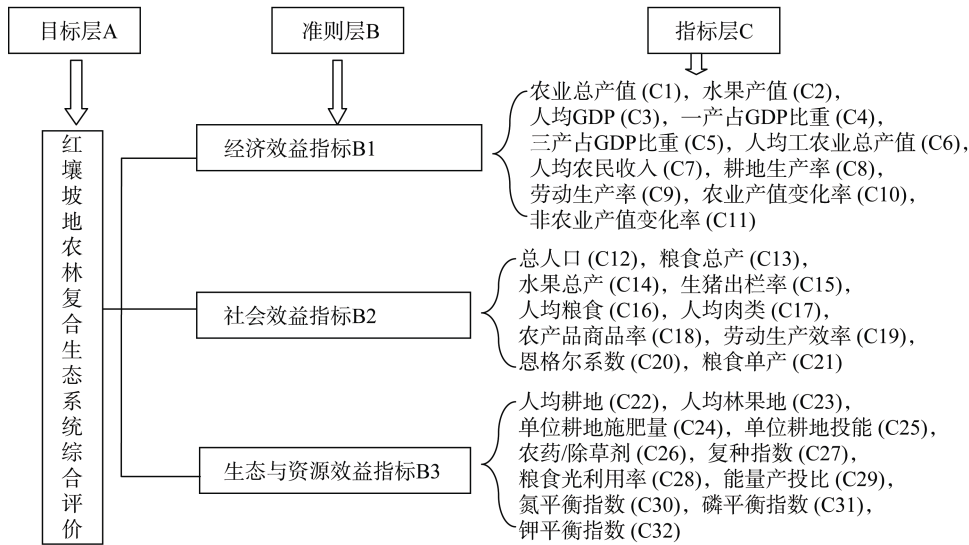


图 2 农林复合生态系统可持续发展层次模型

Fig. 2 Hierarchical model about sustainable development of agroforestry system

2) 构造判断矩阵并向专家咨询。根据图 2 的指标体系及其分层,分别编制由第二层 3 个指标构成的权重判断矩阵表,以及每个第二层指标下属的第三层指标的判断矩阵表,即资源生态功能效益指标权重、经济功能效益指标权重以及社会效益指标权重判断矩阵表。

为了使权重有较高的代表性、准确性和权威性,在对资料进行实际分析之后通过专家咨询表向相关专家进行咨询,最后获得比较一致的判断结果。

3) 进行层次单排序和一致性检验。其中矩阵内的数值为判断矩阵的系数,如 A-B 判断中的 $b_{ij}(i, j = 1, 3, 5)$ 表示对 A 层而言 B_i 对 B_j 相对重要性的数值体现。判断矩阵的系数采用 Saaty 提出的 1~9 标度法表示:阶数为 1~9,分别对应的 $R-I$ 为 0.00、0.00、0.58、0.90、1.12、1.24、1.32、1.41 和 1.45。

按上述步骤即可求出各判断矩阵的 W ,即各因素的相对权重。

4) 多指标综合评价。能综合反映农业的发展水平。其过程是选定评价指标,并确定各指标的权重,最后计算评价指标值,然后算出各指标的加权算术平均值,得到一个综合指标值(S)。

$$S = \sum_{i=1}^n W_i P_i$$

式中: W_i 为第 i 个指标的权重; P_i 为第 i 个指标值。

3.3 多指标综合评价结果

用上述评价方法,分别对江西省余江县、赣县,广东省高州市,湖南省桃江县和浙江省义乌市等 5 个典型县市进行了评价^[22-23]。评价结果如下:

高州市:综合效益呈上升趋势,最低点出现在 20 世纪 60 年代初期(1961 年 0.197 3),最高点是 1998 年(0.691 2),综合评价在 90 年代后上升较快,说明农林复合生态系统可持续发展能力不断增强;经济效益也呈现上升趋势,1949—1951 年评价价值变化大,1952—1979 年评价价值为 0.08 ~ 0.11,1979 年后急剧上升,1998 年达到最大值(0.832 8);社会效益呈现明显的波动上升趋势,60 年代出现低谷期,80—90 年代波动较大,说明社会财富在系统发展过程中积累越来越丰富;生态效益总体上呈下降的趋势,1953 年后下降迅速,1988 年达到最低值(0.251 6),1989 年后评价价值有了一定的提高,说明生态环境得到了一定的重视。

赣县:综合效益先降后升,最低点出现在 1963 年(0.150 0),最高点是 1998 年(0.701 1),1991 年后

加速上升,说明该时期是社会经济发展较快和最强的时期;经济效益也呈上升趋势,1949—1958年逐步上升,1959—1983年评价值为0.08~0.13,经济发展相对缓慢,1984年后急剧上升,1998年达到最大值(0.857 3);社会效益波动上升,特别是由1958年的0.231 9下降到1961年的0.086 8,在这之后基本上是平稳上升;生态效益呈下降趋势,1952年后评价值下降迅速,1986年达到最低值(0.168 6),1987年后逐年回升,说明生态环境得到一定的改善。

桃江:综合效益基本呈上升趋势,最低点出现在1961年(0.103 0),最高点是1998年(0.679 3),综合评价在1989年后加速上升;经济效益呈上升趋势,1961年出现最低点(0.004 9),1989年后强势上升,1998年达到最大值(0.891 7);社会效益表现为上升趋势,但1959—1962年下降明显,在这之后基本上是平稳上升;生态效益呈下降趋势,1954—1957年下降最明显,近年来出现一定的回升但幅度不大。

义乌:综合效益先降后升,最低点出现在1960年(0.158 5),最高点是1998年(0.646 6),整个变化幅度不大;经济效益呈现上升趋势,1980年后上升迅速,1998年达到最大值(0.775 9);社会效益波动上升,由1949年的0.098 5上升到1998年的0.847 3;生态效益呈现下降的趋势,表现在评价逐年下降,1949—1959年下降幅度较大,1960年后较平稳。

余江:综合效益平稳上升,1989年以前变化幅度不大,1989年后加速上升;经济效益类似综合效益,1984年前平稳上升,1984年后上升迅速,1998年达到最大值(0.832 8);社会效益波动上升,由1949年的0.050 6上升到1998年的0.842 4;生态效益不断呈现下降趋势,1952—1963年下降幅度大,1969年后较平稳,1988年后有一定的上升趋势。

3.4 多指标综合比较评价

采用多指标综合评价,优点在于考虑问题全面,能综合反映农业的发展水平。其过程是选定评价指标,并确定各指标的权重,最后计算评价指标值,然后算出各指标的加权算术平均值,得到一个综合指标值(S)。采用该方法我们分别对江西省余江县、赣县,广东省高州市,湖南省桃江县和浙江省义乌市等5个典型县市进行了评价。评价结果如下:

各县市在20世纪90年代综合、经济和社会效益最高,说明进入90年代后社会、经济和环境可持续发展的能力逐渐增强;而在60年代综合效益、经济效益出现最低,说明该时段综合发展能力受到极大限制;50年代的生态环境保持最好,90年代的环境也不是最低,说明生态环境问题已经

得到重视。

综合效益义乌90年代最高,赣县60年代最低,说明义乌90年代综合发展能力最强,赣县60年代综合发展能力最弱;经济效益义乌90年代最好,桃江60年代最差;社会效益义乌90年代为最好,50年代以高州、义乌和余江最差,赣县和桃江60年代最差;生态效益50年代最好(赣县90年代最好),60年代最差(高州最差)。

4 红壤农林复合生态系统的优化与调控

4.1 优化目标与方案^[1]

调控原则:一定的物质能量投入,能够保持系统的持续和稳定发展,获得更多的人类可利用的产品。

调控目标:解决目前存在的主要问题;实现农业生产的高度集约化,农业生产的持久性,农业生产综合化和土壤高度肥沃化。

调控途径:利用各种不同的生物或种类去适应环境;改造某些生物去适应不同环境;改造环境去适应生物需要;对环境和生物同时改造,以达到两者的相互适应。

优化方案:进一步经营好现有耕地,大力开展低丘岗地和水资源,振兴林果业,促进农、林、牧、渔业持续发展,建立一个布局合理、结构协调的综合农林复合生态体系。同时实现3个转变:由单纯经营耕地转变到丘、岗、田、水的系统布局,提高土地利用率;由粗放经营转变到集约经营,提高单产和品质;由原料生产转变到产、加、销综合经营,提高经济效益。此外,还必须实行经济目标与生态目标的统一,达到生态系统良性循环。

4.2 结构调控^[25]

1) 调整产业结构:合理调整第一、二、三产业间的比重,使它们分别达到25%、35%和40%左右。义乌和高州在产业间调整的程度较小,但在各产业内部调整的程度要大;余江、赣县和桃江产业间调整的力度要大,产业内部要协调发展。

2) 调整土地利用结构:主要是调整农林果的比例,部分土地退耕还林草,在荒山恢复植被覆盖,减少水土流失,合理开发淡水资源,减少“人放天养”的局面。发达地区尤其要注重环境治理;不发达地区要停止污染严重的厂矿建设和已建污染厂矿防污设施的改造和建设。

3) 调整种植业结构:减少粮食面积,特别是水稻面积,进行多种经营,发展果草业和养殖业,实施立体种植、食物链养殖、种养循环。

4) 增加科技和资金投入:农村出现的各种问题如种植方式、品种、污染、加工与流通等均与农民的低素质和资金缺乏直接相关;对农民进行科技培训,使他们掌握先进的科学技术和科学种田的思路将是解决三农问题的根本,大量资金的投入将是解决三农问题的直接动力。

4.3 功能调控

推广应用较优化的种植模式:实行立体种植模式,取得比较明显的经济、生态和社会效益;开发、集成并应用实用的农业生态增产技术;稳定农业有关政策;实现种养加贸的有机结合;减少行政干预等^[26-27]。

4.4 调控措施

包括灌水、节水和调控措施;平衡施肥、水肥调控和作物秸秆还田措施;调整人工辅助能的投能结构,发展食用菌,改进饲养技术,促进鱼塘立体养殖。

5 红壤农林复合生态系统的研究展望

1) 农林复合生态系统的分类有多种多样的方法,目前还没有统一的标准,分类的方式多种多样,一般都是根据研究的目的而进行分类;而对于有丰富的生物资源的红壤地区而言,如何进行合理的分类,考虑的不只是农业本身,还得考虑其他行业,本文提出的复合度问题,也只是反映农林复合的一个方面,还有其他很多要考虑的地方,因而分类还有很多工作要做,一个健全的分类要不断进行完善。

2) 农林复合生态系统的评价。应用层次分析法(AHP)和 Delphi 法两种方法结合进行评价文献很少,本文在研究红壤区农林复合生态系统方面开创了先河,也是一个新方法在系统研究上的探讨。进一步工作是建立一种指标测试与表述方法,对指标进行增减并评价对结果的影响程度,过去指标因子往往用状态与过程表述,量化这些因子也是目前和今后研究的重点,采用何种方法来模拟这个过程仍然处于研究阶段。因此,从理论上阐述各类指标的内在因果关系,或将系统结构与系统功能结合考虑,在实践中检验其合理性,该方法的逐步完善,对任何农业生态系统进行综合评价都有指导和借鉴意义。

3) 农林复合生态系统演替随时间变化而发生状态的演替或“位移”,在空间上也会呈现一定的分布格局,不同的农林复合生态系统构成不同的农林复合产业结构,形成不同的农林复合产业类型,不同农林复合产业变化和产业内部变化反馈整个系统的演替情况。农林复合生态系统时空分布与演替规律的研究

可对农林复合生态系统的设计与构建、区域模式群的景观生态规划与布局提供重要的理论依据与实践指导。但是引起红壤丘陵区农林复合生态系统形成与演替的动因有哪些,其运行的内在机制如何,目前是一个较为薄弱的研究领域。例如该地区不同生态区域土壤化学、物理学和生物学肥力的演变规律与主要驱动因子及机制,土壤肥力演变与生态环境之间的相互关系研究等方面均不够完善。

4) 在农林复合生态系统中,注重生态效益、经济效益和社会效益的协调统一。社会要持续发展,不能以牺牲环境资源为代价,应该重视资源和环境问题。因此,如何更好地评价农林复合生态系统的效益,以及生态、经济和社会效益的协调问题也有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 李文华. 中国农林复合经营[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1-20
- [2] 余新晓, 牛健植, 关文彬. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 1 357
- [3] 李庆远. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 7-20
- [4] 赵其国. 红壤物质循环及其调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 7-39
- [5] 何园球, 吴大付, 李成亮. 红壤旱地不同种植方式物质循环与调控[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1 547-1 551
- [6] Perrin RM. Pest management in multiple cropping systems[J]. Agro. Ecosystems, 1977, 3: 93-118
- [7] 赵其国, 何园球, 张桃林, 王明珠. 红壤低丘岗地的优化农业生态模式[A]//红壤生态实验站. 红壤生态系统研究(第三集)[C]. 南昌: 江西科技出版社, 1994
- [8] 孙鸿良. 我国生态农业主要种植模式及其持续发展的生态学原理[J]. 生态农业研究, 1996, 4(1): 15-22
- [9] 何园球. 红壤丘岗区农林渔生态系统结构、功能和优化模式研究[A]//红壤生态实验站. 红壤生态系统研究(第五集)[C]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1998: 1-27
- [10] Nair PKR. Agroforestry defined[A]//Nair PKR. Agroforestry Systems in the Tropics[C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989
- [11] 熊文愈. 生态系统工程与现代混农林业生产体系[J]. 林业学杂志, 1991, 10(1): 21-26
- [12] 宋兆民, 孟平. 中国农林业的结构与模式[J]. 世界林业研究, 1993, 6(5): 77-82
- [13] 黄宝龙, 黄文丁. 林农复合经营生态体系的研究[J]. 生态学杂志, 1991(3): 27-32
- [14] 朱清科, 沈应柏, 朱金兆. 黄土区农林复合系统分类体系研究[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(3): 36-40
- [15] 孙述涛. 林农复合系统分类及命名[J]. 南京林业大学学报, 1995, 19(4): 75-79
- [16] 陈长青, 何园球, 卞新民. 东南部红壤区农林复合生态系统分类体系研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(9):

- 385-387
- [17] He YQ. Nutrient, cycling and balance in red soil agroecosystem and related management options[J]. *Pedosphere*, 2000, 10(2): 107-116
- [18] 何园球, 吴大付, 李成亮, 王兴祥. 红壤旱地不同种植方式物质循环障碍与调控[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1 547-1 551
- [19] 何园球, 黄小庆. 红壤农业生态系统水分循环、平衡及其调控研究[J]. *土壤*, 1996, 30(1): 20-26
- [20] 章家恩, 骆世明. 农业生态系统模式的形成演替及其空间分布格局探讨[J]. *生态学杂志*, 2001, 20(1): 48-51
- [21] 张卫建, 李春生, 冯金侠. 长江三角洲城乡居民食物消费结构演变及农业生产结构调整[J]. *南京农业大学学报*, 2001, 24(1): 108-112
- [22] 陈长青. 红壤区农林复合系统分析与评价[D]. 南京: 南京农业大学, 2000
- [23] 陈长青, 卞新民, 何园球, 吴大付. 东南部红壤区生态农业模式主成分分析研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(2): 193-197
- [24] 孙鸿良, 齐晔, 顾武. 生态农业效益综合评价的原则、方法与指标体系[J]. *农业现代化研究*, 1986(3): 26-29
- [25] 陈长青, 何园球, 卞新民. 红壤丘陵区县域农林复合生态经济系统健康评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(1): 79-85
- [26] 吴佐礼, 陈聿华. 农业生态系统综合评价与调控研究[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(增刊): 98-104
- [27] 曹文志, 朱鹤健. 福建省农业生态系统的特性与调控[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000

Research and Prospect of Agroforestry Ecosystem in Red Soil Hilly Region of China

HE Yuan-qiu¹, FAN Jian-bo¹, CHEN Yan¹, CHEN Chang-qing²

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

Abstract: In view of agroforestry ecosystem problems in red soil hilly region of China, this paper analyzed the status, structure function and succession rule of structure in agroforestry system; proposed 5-grade classification system of red soil agroforestry systems; initially established framework of evaluation system about agroforestry system and evaluated the complex systems of typical counties and farmers. On this basis, some optimal control measures and the countermeasures were put forward for sustainable utilization of resources, and the further research on agroforestry systems in the area was also prospected.

Key words: Red soil; Agroforestry ecosystem; Evaluate